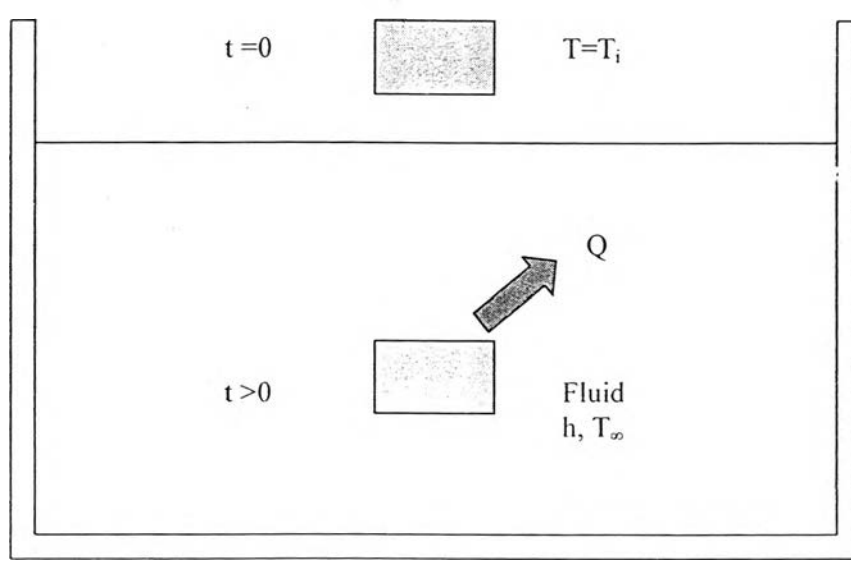
สำนักงานวิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ทฤษฎีพื้นฐาน

3.1 ระบบการจำลองก้อนความจุความร้อน (Lumped Heat-capacity System)

ระบบการจำลองก้อนความจุความร้อน (lumped heat-capacity system) เป็นระบบที่อุณหภูมิสม่ำเสมอทั้งก้อน อุณหภูมิของระบบสามารถเปลี่ยนแปลงตามเวลา และสมมติให้ก้อนวัตถุมีอุณหภูมิเท่ากันในทุกตำแหน่ง แบบจำลองก้อนความจุความร้อนเป็นแบบจำลองทางอุดมคติ เนื่องจากความเป็นจริงอุณหภูมิของวัตถุจะไม่เท่ากันในแต่ละตำแหน่งของก้อนวัตถุ ส่งผลให้เกิดการนำความร้อนในก้อนวัตถุ อย่างไรก็ตามแบบจำลองก้อนความจุความร้อนมีความถูกต้องและสามารถนำมาวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมได้ ระบบการจำลองก้อนความจุความร้อนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงการนำก้อนวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงถูกนำลงในของเหลวเพื่อลดอุณหภูมิ

หากขนาดของก้อนวัตถุมีขนาดเล็กและมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูง จะสามารถสมมติให้อุณหภูมิมีความสม่ำเสมอตลอดกระบวนการ

การใช้ระบบการจำลองก้อนความจุความร้อน เริ่มจากการพิจารณากฎข้อที่ 1 ของอุณหพลศาสตร์มาใช้หาอุณหภูมิในการนำความร้อนแบบสภาวะไม่คงตัว โดยกำหนดให้อุณหภูมิเริ่มต้น T_i (K) ,ปริมาตรของก้อนวัตถุ V (m^3) , ผิวหน้าของวัตถุ A (m^2) , ความหนาแน่นของก้อนวัตถุ ρ (kg/m^3) ,ค่าความร้อนจำเพาะ c_p (J/ kg K) ,อุณหภูมิของของเหลว T_∞ (K) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน h (W/m^2K) คงที่ สมมติให้มวลของของเหลวที่ล้อมรอบวัตถุมีมากกว่าเมื่อเทียบกับมวลของก้อนวัตถุ และอุณหภูมิของของเหลวไม่เปลี่ยนแปลงจากความร้อนของก้อนวัตถุ กำหนดให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างโลหะกับของเหลวเป็นการพาความร้อน กฎข้อที่ 1 ของอุณหพลศาสตร์สำหรับปัญหานี้กล่าวว่า ที่เวลาใดๆ พลังงานที่ได้รับจากของเหลวเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายในของก้อนวัตถุสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$-\rho c_p V \frac{dT}{dt} = hA(T - T_\infty) \qquad (3.1)$$

T เป็นอุณหภูมิในสภาวะไม่คงตัวของก้อนวัตถุ โดยมีอุณหภูมิเริ่มต้นของวัตถุ

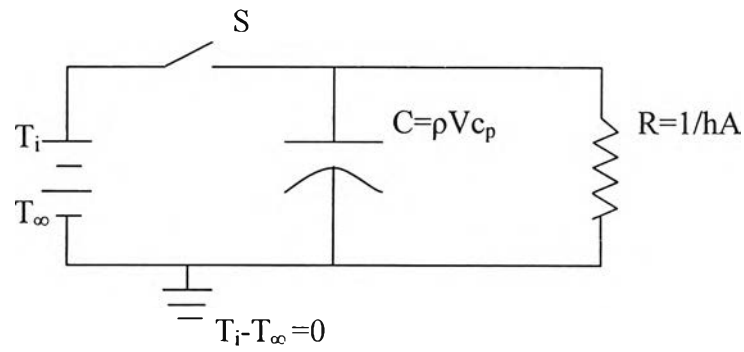
$$T(o) = T_i \qquad (3.2)$$

คำตอบของสมการ (3.5) สามารถเขียนในรูปของเทอมไร้มิติ

$$\frac{(T - T_\infty)}{(T_i - T_\infty)} = \exp\left[-\left(\frac{hA}{\rho V c_p}\right) t\right] \qquad (3.3)$$

สมการ 3.3 แสดงอุณหภูมิของระบบเป็นความสัมพันธ์แบบเอกโพเนนเชียลกับเวลา

พฤติกรรมทางความร้อนของระบบการจำลองก้อนความจุความร้อนสามารถเปรียบเทียบกับพฤติกรรมทางไฟฟ้าของวงจรต้านทานไฟฟ้า ดังแสดงในรูป 3.2 ความจุความร้อนถูกเก็บในสภาพเริ่มต้นที่ $T_i - T_\infty$ โดยสวิตซ์ S ปิด เสมื่อเปิดสวิตซ์ พลังงานสะสมในตัวเก็บประจุจะจ่ายผ่านตัวต้านทาน โดยเมื่อเปรียบเทียบค่า $C = \rho V c_p$ และ $R = \frac{1}{hA}$



รูป 3.2 แสดงความใกล้เคียงกับพฤติกรรมทางไฟฟ้าของวงจรต้านทานไฟฟ้า

ระบบก้อนความจุความร้อน เป็นระบบทางอุดมคติ ก้อนวัตถุจะสามารถพิจารณาด้วยระบบนี้ได้ หากค่าความต้านทานความร้อนภายในมีค่าน้อยกว่า ค่าความต้านทานความร้อนภายนอกมาก กล่าวคือ ค่าความต้านทานของการนำความร้อนมีค่าน้อยกว่าค่าความต้านทานของชั้นขอบเขตการพาความร้อนที่ล้อมรอบวัตถุระบบก้อนความจุความร้อน โดยที่ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขึ้นอยู่กับค่าของตัวเลขไบออท (Biot number, Bi) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$Bi = \frac{h(V/A)}{k} \qquad = \frac{hs}{k} \tag{3.4}$$

ในกรณีที่ Bi << 1 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับระยะทางมีค่าน้อยมาก ในกรณีนี้ $T(x,t) = T(t)$ อุณหภูมิในผนังที่จุดต่างๆมีค่าเกือบเท่ากันและลดลงสู่ค่า T_∞

ในกรณีที่ Bi = 1 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับตำแหน่งจะมีค่ามากขึ้นและถือว่าอุณหภูมิในผนังที่ตำแหน่งต่างๆ มีค่าเท่ากันไม่ได้

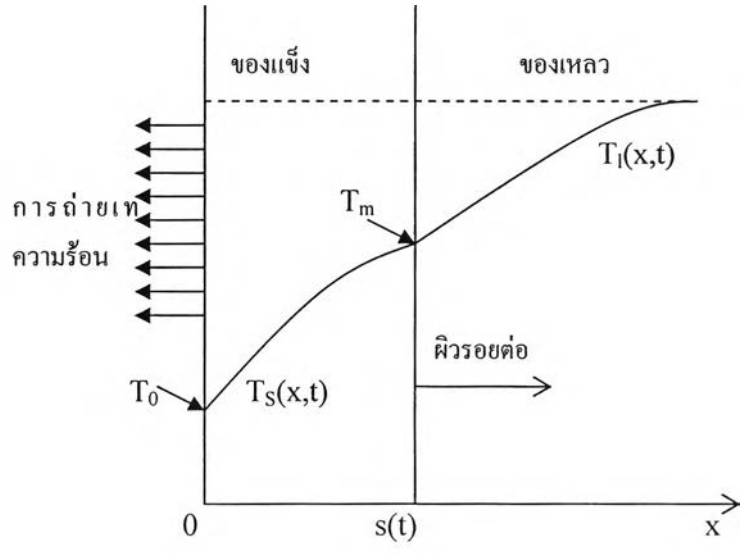
ในกรณีที่ Bi >> 1 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในผนังจะมีค่ามากกว่าค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิระหว่างผนังและของไหล

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปัญหาการเปลี่ยนสถานะ

ปัญหาการเปลี่ยนสถานะ เป็นปัญหาการถ่ายเทความร้อนแบบที่ขึ้นกับเวลา รวมถึงมีการหลอมเหลวหรือแข็งตัว ปัญหาการเปลี่ยนสถานะพบได้ในงานทางวิศวกรรมหลายประเภท เช่น การผลิตน้ำแข็ง การแช่แข็งอาหาร กระบวนการผลิตโลหะหรือพลาสติก เป็นต้น การหาผลเฉลยของปัญหาประเภทนี้ค่อนข้างซับซ้อน เพราะตำแหน่งเส้นแบ่งเขตสถานะมีการเคลื่อนที่ และมีการถ่ายเทความร้อนแฝงที่ตำแหน่งผิวรอยต่อ ทำให้ตำแหน่งของผิวรอยต่อไม่ชัดเจน สำหรับปัญหาการเปลี่ยนสถานะของน้ำ การเปลี่ยนสถานะจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเดียว และสถานะของแข็งและของเหลวถูกแยกกันอย่างชัดเจนโดยผิวรอยต่อแบบ sharp interface

3.2.1 สมการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปัญหาการเปลี่ยนสถานะ

สมการทางคณิตศาสตร์ของปัญหาการเปลี่ยนสถานะสามารถแสดงโดยกำหนดให้ของเหลวมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะที่ T_m อยู่ภายในบริเวณ $0 < x < \infty$ ขณะเริ่มต้นของเหลวมีอุณหภูมิสม่ำเสมอที่ T_i โดยที่ $T_i > T_m$ ที่เวลา $t = 0$ อุณหภูมิของผิวรอยต่อที่ $x=0$ ลดต่ำลงจนมีอุณหภูมิ T_0 โดยที่ $T_0 < T_m$ และ T_0 คงอุณหภูมิไว้เมื่อ เวลา $t > 0$ การแข็งตัวของของเหลวเริ่มต้นที่ผิวหน้าขอบเขตต่อที่ $x=0$ และผิวรอยต่อสถานะของแข็ง-ของเหลว $x=s(t)$ เคลื่อนที่ไปในทิศทาง x ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงแบบจำลองของปัญหาการเปลี่ยนสถานะในหนึ่งมิติ

ค่าอุณหภูมิของสถานะของแข็งและของเหลว แสดงโดย $T_s(x,t)$ และ $T_l(x,t)$ ตามลำดับ สามารถเขียนสมการกำกับได้ ดังนี้

$$\frac{\partial^2 T_x(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_s}\frac{\partial T_x(x,t)}{\partial t} \qquad \text{ที่ } 0 < x < s(t) \qquad ,t > 0 \qquad (3.5)$$

$$\frac{\partial^2 T_l(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_l}\frac{\partial T_l(x,t)}{\partial t} \qquad \text{ที่ } s(t) < x < \infty \qquad ,t > 0 \qquad (3.6)$$

สมมติให้สมบัติของสารมีค่าคงที่ทั้งในสถานะของแข็งและของเหลว s(t) คือ ตำแหน่งของผิวรอยต่อของแข็ง-ของเหลว ซึ่งไม่สามารถหาได้โดยตรงจึงต้องพิจารณาเป็นส่วนหนึ่งของคำตอบ สัญลักษณ์ s และ l หมายถึงสถานะของแข็งและของเหลวตามลำดับ ปัญหานี้มีตัวไม่ทราบค่า 3 ตัว กล่าวคือ $T_s(x,t), T_l(x,t)$ และ s(t) ดังนั้นจึงต้องใช้สมการสมดุลพลังงานที่ผิวรอยต่อ ที่ x=s(t) จึงนำมาใช้เพื่อร่วมแก้ปัญหา ดังนี้

$$\frac{k_s \partial T_x}{\partial x} - \frac{k_l \partial T_l}{\partial x} = \rho L \frac{ds(t)}{dt} \qquad \text{ที่ } x = s(t) \qquad ,t > 0 \qquad (3.7)$$

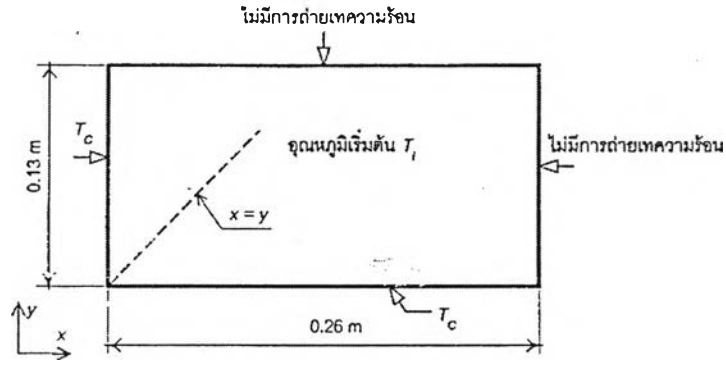
เมื่อ L คือ ความร้อนแฝงต่อหน่วยมวลที่เกิดขึ้นขณะมีการเปลี่ยนสถานะ และสมมติให้ค่าความหนาแน่นของทั้งสองสถานะมีค่าเท่ากัน $\rho_l = \rho_s = \rho$ สมการความต่อเนื่องของอุณหภูมิที่ผิวรอยต่อสถานะของแข็ง-เหลว สามารถเขียนได้ดังนี้

$$T_s(x,t) = T_l(x,t) = T_m \qquad ,x=s(t) \qquad (3.8)$$

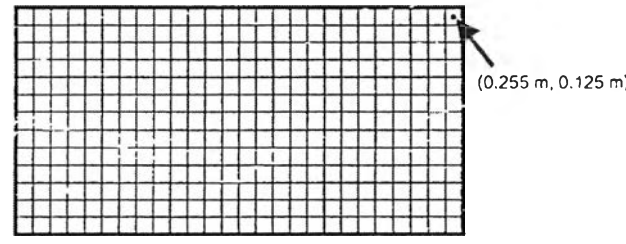
สมการ (3.5),(3.6) และ (3.7) เป็นสมการกำกับของการกระจายอุณหภูมิใน สถานะของแข็ง ของเหลว และ ตำแหน่งของผิวรอยต่อสถานะของแข็ง-ของเหลว สมการ (3.8) เป็นเงื่อนไขขอบเขต ส่วนเงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้นสามารถสมมติตามสภาพทางกายภาพของปัญหา

3.2.2 กรณีศึกษาปัญหาการเปลี่ยนแปลงสถานะในสองมิติ

ปัญหาตัวอย่างจากงานวิจัยของ รจนา ประไพนพ และ กุณฑิณี มณีรัตน์ (2004) ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์-วอลุมจำลองปัญหาเปลี่ยนสถานะ 2 มิติ ซึ่งพิจารณาพื้นที่ภาคตัดซึ่งขนานกับพื้นราบ คือ พื้นที่ขนาด กว้าง 0.26 เมตร ยาว 0.52 เมตร ที่เวลาเริ่มต้น $t_0 = 0$ วินาที มีอุณหภูมิเริ่มต้น $T_i = 30°C$ สม่ำเสมอภายในบริเวณของปัญหา เงื่อนไขขอบเขตที่ขอบทุกด้านมีอุณหภูมิคงที่ตลอดที่ $T_c = -10°C$ ไม่มีการถ่ายเทความร้อนในทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่และจากความสมมาตรของปัญหาจึงพิจารณาเพียงหนึ่งในสี่ของพื้นที่หน้าตัด แสดงไว้ในรูปที่ 3.4(ก) โดย กำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่กึ่งกลางความยาวของปัญหาให้ไม่มีการถ่ายเทความร้อน ส่วนคุณสมบัติของสารซึ่งในที่นี้คือ น้ำ ซึ่งมีสมบัติต่างๆดังนี้ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน $k_L = 0.556\,W/(m\cdot K)$, ค่าความจุความร้อนจำเพาะ $c_L = 4.226kJ/(kg\cdot K)$, ค่าความหนาแน่น $\rho_L = 1000kg/m^3$ สำหรับสถานะของแข็งค่า ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน $k_S = 2.220\,W/(m\cdot K)$, ค่าความจุความร้อนจำเพาะ $c_S = 1.762kJ/(kg\cdot K)$, ค่าความหนาแน่น $\rho_S = 1000\,kg/m^3$ ค่าปริมาณความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง $L = 338kJ/kg$ และ อุณหภูมิเยือกแข็ง $T_F = 0°C$



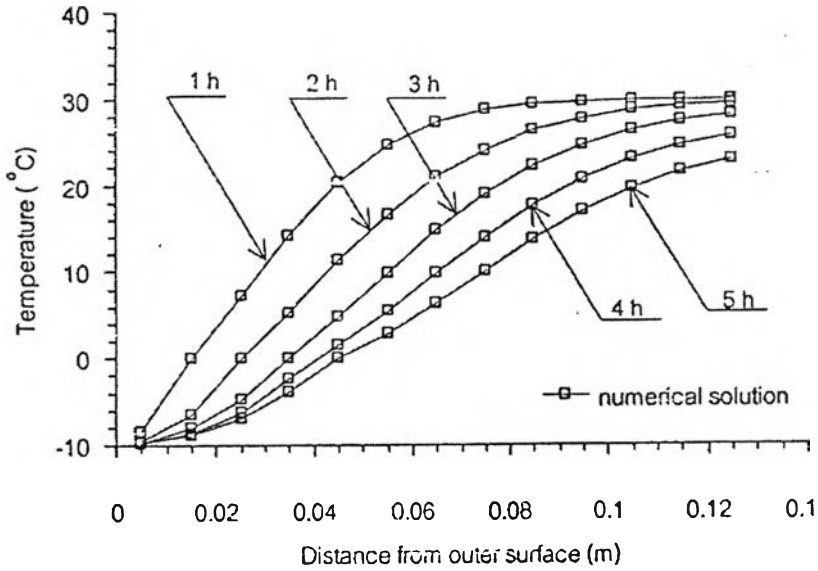
(ก) รูปร่างหนึ่งในสี่ส่วนของปัญหา เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต



(ข) ตัวอย่างการแบ่งกริดขนาด 26*13 cells

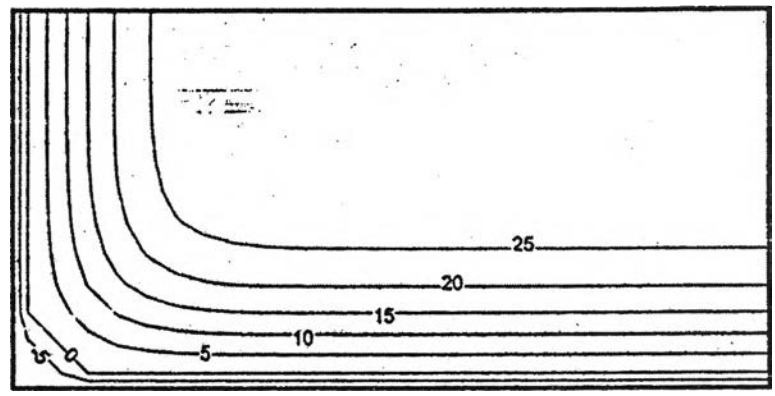
รูปที่ 3.4 การเปลี่ยนสถานะในสองมิติ กรณีศึกษา (ก) รูปร่างหนึ่งในสี่ส่วนของปัญหา เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต และ (ข) ตัวอย่างการแบ่งกริดขนาด 26 x 13 cells

เมื่อกำหนดเงื่อนไขขอบเขตดังกล่าว จะได้ผลการกระจายของอุณหภูมิตามตำแหน่ง x=y ที่เวลา 1, 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง เส้นความชันของอุณหภูมิที่เวลา 1 และ 5 ชั่วโมง ดังจะแสดงไว้ในรูปที่ 3.5 ความชันของเส้นรอยต่อสถานะแสดงในรูป และการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง (0.225เมตร, 0.125 เมตร) ที่เวลาต่างๆ

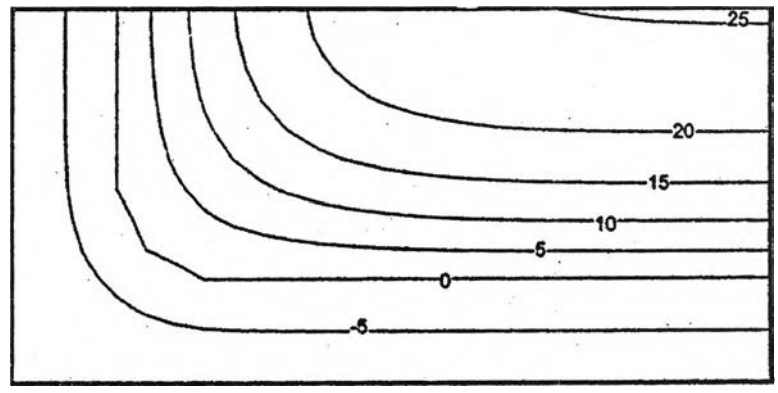


รูปที่ 3.5 การกระจายของอุณหภูมิตามตำแหน่ง x = y สำหรับปัญหาการเปลี่ยนสถานะในสองมิติขนาดจำกัดที่มี T_i=30 °C และ T_C=-10 °C

การกระจายตัวของจุดต่อที่ตำแหน่ง (0.255 เมตร, 0.125 เมตร) ตามเวลาแสดงไว้ในรูปที่ 3.6 (ก) จะเห็นว่าในช่วงที่เปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งคืออุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง 0 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วกว่าช่วงที่เป็นของเหลว เนื่องจากค่า thermal diffusivity ของน้ำแข็งมีค่ามากกว่าน้ำ และรูปร่างของปัญหากลายเป็นน้ำแข็งที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิขอบเขต เมื่อเวลาในการทำความเย็น 42 ชั่วโมง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตน้ำแข็งซองในโรงงานจริงที่มีขนาดกว้าง 0.28 เมตร ยาว 0.56 เมตร สูง 1.50 เมตร เมื่อนำน้ำที่มีอุณหภูมิห้อง หรือประมาณ 30 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิขอบเขต -10 องศาเซลเซียส จะใช้เวลาในการทำน้ำแข็งประมาณ 48 ชั่วโมงขึ้นไป จะเห็นได้ว่าผลเฉลยที่ได้มีความสอดคล้องกับข้อมูลในทางปฏิบัติ แต่ข้อสังเกตคือ การจำลองปัญหาเป็นสองมิติ ไม่ได้คิดการเปลี่ยนแปลงในแนวตั้ง เวลาในการทำความเย็นจึงเร็วกว่าข้อมูลในทางปฏิบัติ และอาจสรุปได้ว่า กระบวนการผลิตน้ำแข็งสามารถควบคุมสภาพแวดล้อมบางประการเพื่อลดเวลาที่ใช้ในการผลิตลงได้



(ก) t = 1 h

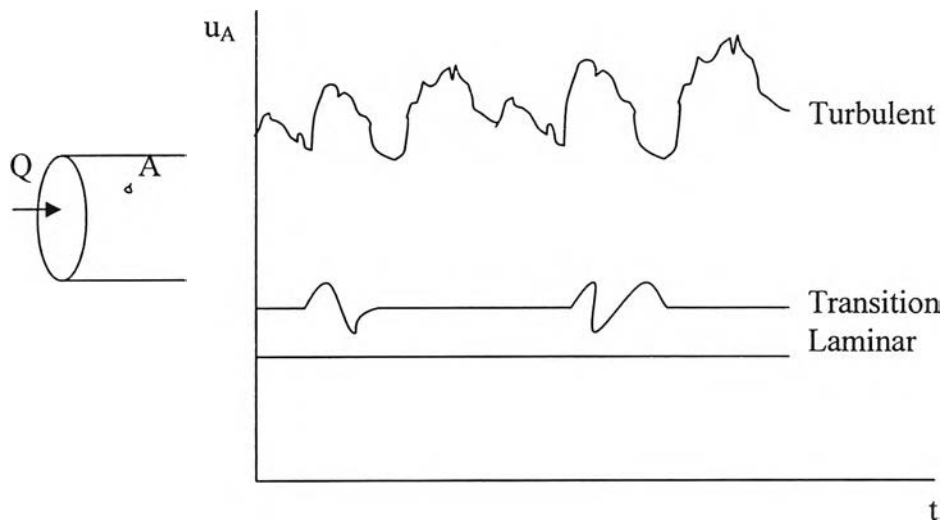


(ข) t = 5 h

รูปที่ 3.6 แสดงเส้นความชันของอุณหภูมิ สำหรับปัญหาการเปลี่ยนสถานะในสองมิติขนาดจำกัดที่มี T_i=30 ^{0}C และ T_C=-10 ^{0}C (ก) t = 1 h (ข) t = 5 h

3.3 ลักษณะของการไหลในท่อ (Characteristic Of Pipe Flow)

การไหลของของไหลในท่อแบ่งโดยลักษณะการไหลออกเป็น การไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) โดยการไหลในท่อที่พบในทางปฏิบัติโดยส่วนมากเป็นการไหลแบบปั่นป่วน โดยรูปแบบการไหลแยกแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ตำแหน่งหนึ่ง ในพื้นที่หน้าตัดการไหลแสดงไว้ในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและเวลาที่ตำแหน่ง A

การไหลในท่อจะมีเทอมไร้มิติ คือ ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number ,Re) เป็นอัตราส่วนระหว่างอิทธิพลของความเฉื่อย และอิทธิพลของความหนืด ของการไหล ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$Re = \frac{\rho \bar{V} D}{\mu} = \frac{\bar{V} D}{\nu} \qquad (3.9)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่น (kg/m^3)

$\bar{V}$ คือ อัตราเร็วเฉลี่ยในท่อ (m/s)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (m)

μ คือ ค่า dynamic viscosity (Pa/s)

ν คือ ค่า kinematic viscosity (m^2/s)

ช่วงของตัวเลขเรย์โนลด์สำหรับการไหลในท่อขึ้นกับลักษณะของการไหลในท่อ เช่น การสั่นของท่อ , ความขรุขระของผิวท่อ แต่โดยทั่วไปช่วงของตัวเลขเรย์โนลด์ที่ใช้พิจารณาลักษณะของการไหลในท่อที่เหมาะสมคือ

- การไหลแบบราบเรียบ มีค่า Re < 2100
- การไหลแบบปั่นป่วน มีค่า Re > 4000
- การไหลแบบทรานซิชั่น (transition flow) มีค่า 2100 < Re < 4000

เมื่อพิจารณาการไหลแบบคงตัวในท่อขนาดพื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอ A จากจุด 1 ไปยังจุด 2 ซึ่งมีความดัน p_1และ p_2 ตามลำดับ พลังงานในหน่วยความสูงที่จุด 1 และ 2 คือ $z_1+p_1/\gamma+V^2/2g$ และ $z_2+p_2/\gamma+V^2/2g$ พลังงานส่วนที่เสียในช่วงการไหลจากจุด 1 ไปยังจุด 2 คือ h_L เนื่องจากการไหลเป็นแบบคงตัวและมีพื้นที่หน้าตัดการไหลคงที่ ดังนั้นสมการโมเมนตัมในแนวตามยาวของท่อ คือ

$$\Sigma F=0 \tag{3.10}$$

$$p_1 A - p_2 A - \gamma LA\sin\alpha - \bar{\tau}_w PL = 0 \tag{3.11}$$

แต่ $\sin\alpha = (z_2-z_1)/L$

ดังนั้นหัวน้ำสูญเสีย (head loss) สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์

$$h_L = \bar{\tau}_w \frac{PL}{\gamma A} = \bar{\tau}_w \frac{L}{\gamma R_h} \tag{3.12}$$
$$= (z_1 + \frac{p_1}{\gamma}) - (z_2 + \frac{p_2}{\gamma})$$

เมื่อ $\bar{\tau}_w$ คือ ความเค้นเฉือนเฉลี่ยของผนังท่อ

P คือ เส้นขอบเปียก(wetted perimeter)

R_h คือ รัศมีไฮดรอลิก (hydraulic radius) = A/P

สำหรับการไหลในท่อผิวเรียบซึ่ง ความเค้นเฉือนเฉลี่ยของผนังท่อ ขึ้นกับค่า ρ , μ , Vและ R_h โดย

$$\bar{\tau}_w = C_f \frac{\rho \bar{V}^2}{2} \tag{3.13}$$

$$h_L = C_f \frac{L}{R_h} \frac{\bar{V}^2}{2g} \tag{3.14}$$

ในกรณีท่อกลม $R_h=D/4$

$$h_L = 4C_f \frac{L}{D}\frac{\bar{V}^2}{2g} = f \frac{L}{D}\frac{\bar{V}^2}{2g} \tag{3.15}$$

สมการ (3.15) มีชื่อเรียกว่า pipe-friction equation หรือ Darcy-Weisbach equation สำหรับการไหลในท่อกลมซึ่งมีผนังท่อห่างจากเส้นศูนย์กลางเท่าๆกัน

$$\tau_w = \bar{\tau}_w = C_f \rho \frac{\bar{V}^2}{2} = \frac{f}{4}\rho\frac{\bar{V}^2}{2} \tag{3.16}$$

$$\text{หรือ } \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = u_* = \sqrt{\frac{f\bar{V}^2}{8}}$$

พิจารณาสมการพลังงานสำหรับการไหลในท่อ โดยสมมติให้งานเนื่องจากเพลาหมุน(shaft work) แรงเฉือน(viscous work) และอื่นๆ มีค่าเท่ากับศูนย์ สมมติให้การไหลเป็นแบบคงตัวและไม่ยุบตัว โดยให้พลังงานภายในและความดันมีค่าสม่ำเสมอในแต่ละหน้าตัดการไหล สมการพลังงานสำหรับปริมาตรควบคุม แสดงได้ดังนี้

$$\dot{Q} = \int_{CS}(e + pv)\rho\vec{V}.d\vec{A} \tag{3.17}$$

$$= \dot{m}(u_2 - u_1) + \dot{m}\left(\frac{p_2}{\rho} - \frac{p_1}{\rho}\right) + \dot{m}g(z_2 - z_1)$$

$$+ \int_{A2}\frac{\bar{V}_2^2}{2}\rho\bar{V}_2.dA_2 - \int_{A1}\frac{\bar{V}_1^2}{2}\rho\bar{V}_1.dA_1$$

ความเร็วในแต่ละหน้าตัดของการไหลมีค่าไม่สม่ำเสมอ จึงใช้ความเร็วเฉลี่ย และค่าสัมประสิทธิ์พลังงานจลน์ α มาใช้ในการอินทิเกรต โดย

$$\int_A \frac{V^2}{2}\rho V\,.dA = \alpha\int_{A1}\frac{\bar{V}^2}{2}\rho V.dA \tag{3.18}$$

$$= \alpha\,\dot{m}\,\frac{\bar{V}^2}{2}$$

โดยการไหลแบบราบเรียบในท่อ $\alpha = 2.0$ การไหลแบบปั่นป่วนในท่อ α ขึ้นกับค่า n จากความสัมพันธ์

$$\alpha = \left(\frac{U}{\overline{V}}\right)^3 \frac{2n^2}{(3+n)(3+2n)} \tag{3.19}$$

ค่า α จะเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อเทียบกับค่า n ที่เปลี่ยน โดย α จะมีค่าประมาณ 1 ดังนั้นการไหลในท่อซึ่งส่วนมากพบว่าเป็นการไหลแบบปั่นป่วน จึงใช้ค่า $\alpha = 1$

$$\dot{Q} = \dot{m}(u_2 - u_1) + \dot{m}\left(\frac{p_2}{\rho} - \frac{p_1}{\rho}\right) + \dot{m}g(z_2 - z_1) + \dot{m}\left(\frac{\alpha_2 \overline{V}_2^2}{2} - \frac{\alpha_1 \overline{V}_1^2}{2}\right) \tag{3.20}$$

$$\frac{\delta Q}{\delta m} = (u_2 - u_1) + \left(\frac{p_2}{\rho} - \frac{p_1}{\rho}\right) + g(z_2 - z_1) + \left(\frac{\alpha_2 \overline{V}_2^2}{2} - \frac{\alpha_1 \overline{V}_1^2}{2}\right) \tag{3.21}$$

$$\left(\frac{p_1}{\rho} + \frac{\alpha_1 \overline{V}_1^2}{2} + gz_1\right) = \left(\frac{p_2}{\rho} + \frac{\alpha_2 \overline{V}_2^2}{2} + gz_2\right) + (u_2 - u_1) - \frac{\delta Q}{\delta m} \tag{3.22}$$

เทอม $(u_2 - u_1) - \frac{\delta Q}{\delta m}$ คือผลต่างของพลังงานต่อหนึ่งมวลระหว่างหน้าตัด 1 และ 2 ซึ่งเป็นความสูญเสียที่เกิดขึ้นและเมื่อเขียนในเทอมพลังงานของพลังงานต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก (หัวน้ำ,head)

$$\left(\frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 \overline{V}_1^2}{2g} + z_1\right) = \left(\frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 \overline{V}_2^2}{2g} + z_2\right) + h_{LT} \tag{3.23}$$

เมื่อ h_{LT} คือหัวน้ำสูญเสียรวม (total head loss)

หัวน้ำสูญเสียรวมของการไหลในท่อประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

1. หัวน้ำสูญเสียหลัก (major head loss,h_L) คือ ความสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานในท่อ สูตรที่ใช้ในการคำนวณคือ สมการ Darcy-Weisbach โดย

$$h_L = f \frac{L}{D} \frac{\overline{V}^2}{2g} \qquad (3.24)$$

เมื่อ h_L = หัวน้ำสูญเสียหลัก (m)

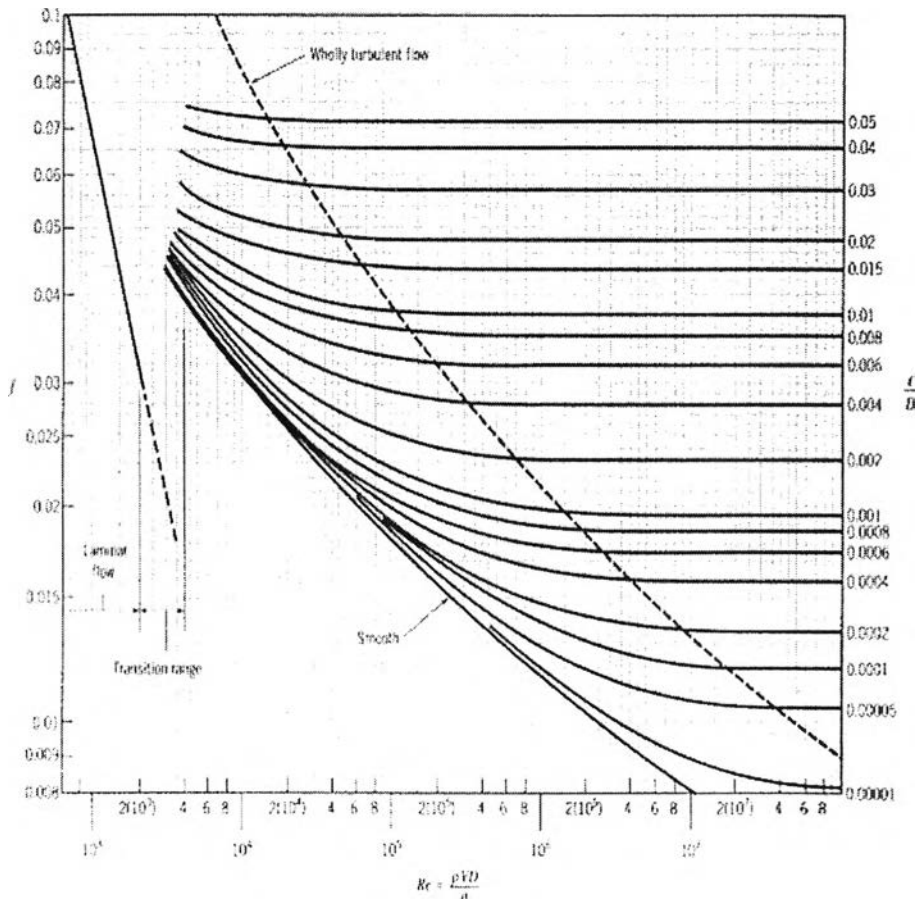
f = ตัวประกอบความเสียดทาน สามาถหาได้จากแผนภาพ Moody ที่แสดงในรูปที่ 3.8 โดยที่ตัวประกอบความเสียดทานเป็นฟังก์ชั่นของตัวเลขเรย์โนลด์ และค่า equivalent roughness ε

$f = f(Re, \varepsilon)$

L = ความยาวท่อ (m)

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)

$\overline{V}$ = อัตราเร็วเฉลี่ยของหน้าตัดการไหล(m/s)



รูปที่ 3.8 แสดง Moody chart สำหรับการไหลภายในท่อ

ตารางที่ 3.1ค่า equivalent roughness สำหรับท่อ

ชนิดของท่อ	equivalent roughness,Ɛ	
	ft	mm
Riveted steel	0.003-0.03	0.9-9.0
Concrete	0.001-0.01	0.3-3.0
Wood stave	0.0006-0.003	0.18-0.9
Cast iron	0.00085	0.26
Galvanezed iron	0.0005	0.15
Commercial steel		
Or wrought iron	0.00015	0.045
Drawn tubing	0.000005	0.0015
Plastic,glass	0.0(smooth)	0.0(smooth)

2. หัวน้ำสูญเสียรอง (minor head loss, h_{Lm}) คือ ความสูญเสียเนื่องจากการไหลผ่านส่วนอื่นๆ เช่น ข้อต่อ ลิ้น ช่องทางเข้า-ออก การคำนวณหาหัวน้ำสูญเสียรอง โดยสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$h_{Lm} = K \frac{\overline{V}^2}{2g} \tag{3.25}$$

เมื่อ K คือ สัมประสิทธิ์ การสูญเสีย หรือ โดยการเทียบเป็นความยาวของท่อตรงที่ให้ค่าหัวน้ำสูญเสียที่เท่ากันเรียกว่า ความยาวสมมูล (equivalent length, Le)
โดยสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$h_L = f \frac{Le}{D} \frac{\overline{V}^2}{2g} \tag{3.26}$$

โดย ค่า K และ Le/D สำหรับวาล์วและข้อต่อชนิดต่างๆ ที่ใช้โดยทั่วไปแสดงไว้ดังตารางที่ 3.2

หอสมุดกลาง สำนักงานวิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.2 แสดงค่า K และ Le/D สำหรับวาล์วและข้อต่อชนิดต่างๆ

ชนิด	K	Le/D
วาล์ว (เปิดเต็มที่)		
- แบบเกตวาล์ว(gate valve)	0.19	7
- แบบโกลบวาล์ว (globe valve)	10	350
- แบบมุม(angle valve)	5	175
- แบบสวิง (swing check valve)	2.5	135
- แบบลิฟต์ (lift check valve)		
1.globe lift	10	350
2.angle lift	5	175
ข้องอมาตรฐาน		
- 90 องศา	0.8	30
- 45 องศา	0.42	15
ข้องอกลับ(close-return bend)	2.2	75
ข้อต่อสามทางมาตรฐาน		
- ไหลตรง	0.9	20
- ไหลแยก	1.8	60

3.4 ระบบการผลิตน้ำแข็งซอง

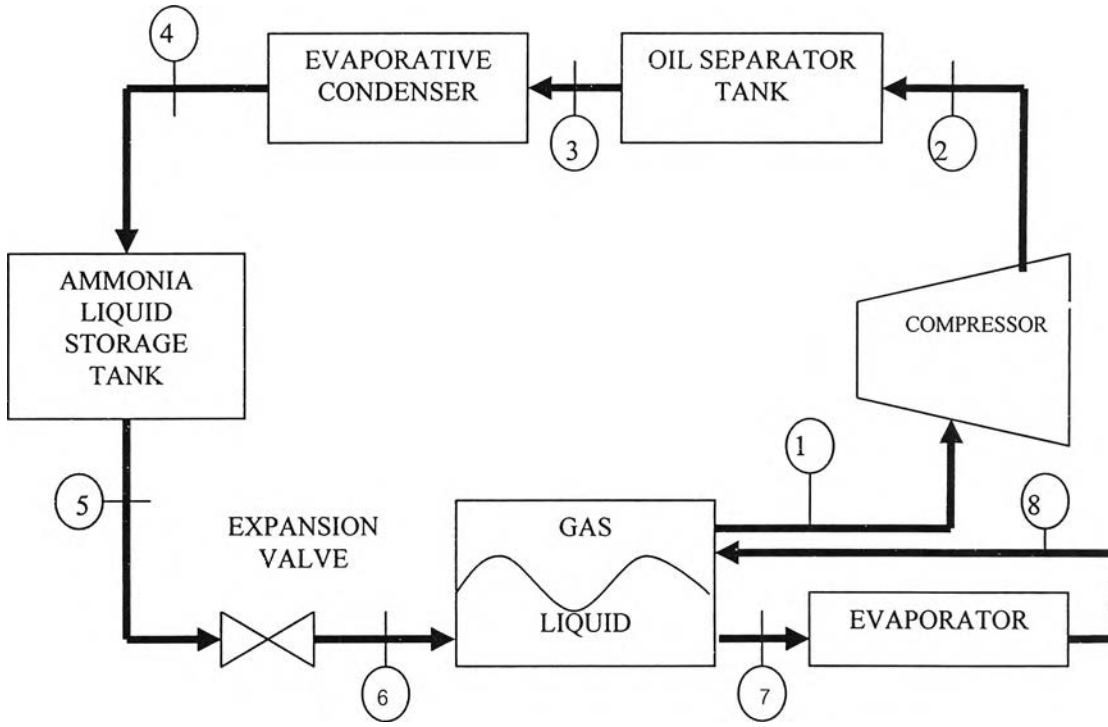
ในกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองของโรงงาน น้ำแข็งซองมีขั้นตอนในการผลิต เริ่มจากการน้ำดิบบรรจุลงในซองซึ่งเรียงกันเป็นแถว จากนั้นจึงใช้เครนยกซองน้ำแข็งแช่ลงในบ่อน้ำเกลือ ทำความเย็นต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งอุปกรณ์ในการผลิตน้ำแข็งซองออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนของวัฏจักรการทำความเย็น และส่วนของระบบการจ่ายอากาศลงในซอง ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของทั้งสองระบบ ดังนี้

3.4.1 วัฏจักรการทำความเย็นของระบบการผลิตน้ำแข็งซอง

กระบวนการผลิตน้ำแข็งซองในโรงงานน้ำแข็งนั้นอาศัยหลักการของวัฏจักรการทำความเย็นแบบอัดไอ อุปกรณ์หลักที่ใช้ในกระบวนการเป็นแบบเดียวกับระบบการทำความเย็นแบบอัดไอโดยทั่วไป แต่ได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์เสริมเข้าไปเพื่อความปลอดภัยและเพิ่มสมรรถนะการทำความเย็นของระบบการทำความเย็น

เครื่องอัดไอ (compressor) จะทำการอัดไอของแอมโมเนียจากสภาวะที่ 1 ไปสู่สภาวะที่ 2 แล้วจากนั้นไอที่อัดแล้วจะไหลผ่านถังแยกน้ำมัน (oil separator tank) แล้วเข้าสู่สภาวะที่ 3 ซึ่งเป็นสภาวะก่อนเข้าเครื่องควบแน่น เมื่อผ่านเครื่องควบแน่นแล้วสารทำความเย็นจะควบแน่นกลายเป็นของเหลวไหลในสภาวะที่ 4 แล้วไหลเข้าถังเก็บแอมโมเนียเหลว (ammonia liquid storage tank) หลังจากนั้นแอมโมเนียเหลวจะไหลออกจากถังเก็บแอมโมเนียเหลว เป็นสภาวะที่ 5 แล้วไหลเข้าสู่วาล์วลดความดัน แล้วกลายเป็นสภาวะที่ 6 หลังจากนั้นแอมโมเนียที่อยู่ในสภาวะผสมกันระหว่างไอและของเหลว (mixture) จะไหลเข้าสู่ถังแยกไอและของเหลว (accumulator) เมื่อผ่านถังแยกไอและของเหลว แอมโมเนียในสภาวะที่ 7 จะไหลเข้าสู่เครื่องระเหย แล้วจะเกิดการเดือดจนแอมโมเนียกลายป็นไอแล้ว ไหลออกจากเครื่องระเหย ซึ่งเป็นสภาวะที่ 8 ก่อนที่จะไหลกลับเข้าสู่ถังแยกไอและของเหลว (accumulator) อีกครั้งหนึ่งแล้วจึงดึงเอาส่วนที่เป็นไอไปเข้าเครื่องอัดไอซึ่งเป็นสภาวะที่ 1 ดังรูปที่ 3.9

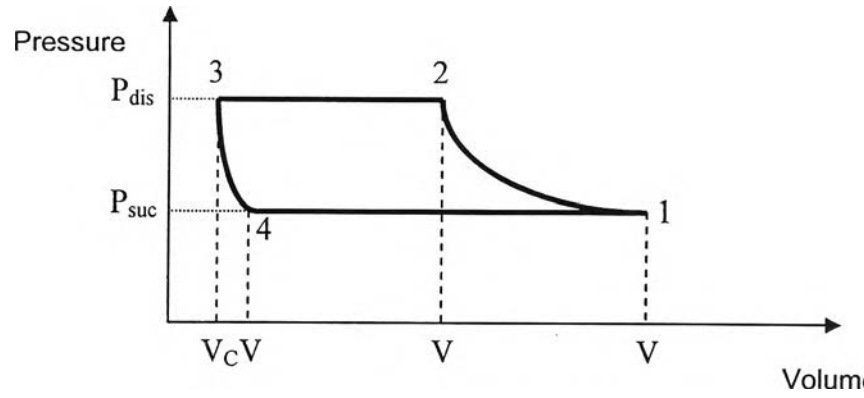


รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะของวัฏจักรการทำงานของโรงน้ำแข็ง

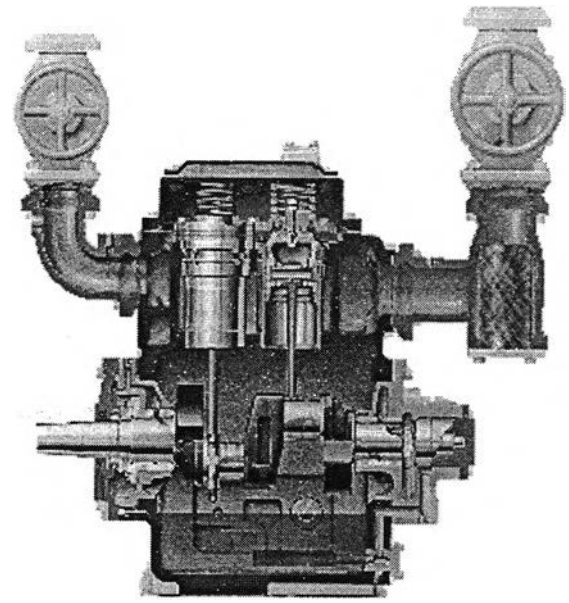
อุปกรณ์แต่ละชนิดมีหน้าที่และหลักการทำงานแตกต่างกัน โดยที่อุปกรณ์ต่างๆ ที่ประกอบกันเป็นวัฏจักรการทำความเย็นของโรงงานทำน้ำแข็งนี้จะได้อธิบายถึงหลักการทำงานอย่างละเอียดโดยแยกออกเป็นแต่ละอุปกรณ์ในหัวข้อย่อยต่อไป

3.4.1.1 เครื่องอัดไอ (Compressor)

การทำงานของเครื่องอัดไอนั้นสามารถแสดงพฤติกรรมได้ดังรูปที่ 3.10(ก) งานที่ให้เข้าไปกับ เครื่องอัดไอ นั้นจะถูกใช้สำหรับเพิ่มความดันไอ , เพิ่มอุณหภูมิของไอ และเพื่อชดเชยความร้อนที่สูญเสียออกไปสู่สิ่งแวดล้อม โดยความต้องการสูงสุดคือการเพิ่มความดันของไอโดยที่ใช้กำลังน้อยที่สุด ถ้ากระบวนการอัดไอเป็นแบบไอเซนทรอปิค (isentropic process) นั่นคือไม่มีการสูญเสียความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมในระหว่างกระบวนการอัดไอเลย ดังนั้นงานในการอัดไอที่น้อยที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อกระบวนการอัดเป็นแบบไอเซนทรอปิค นั่นหมายความว่าไม่มีการสูญเสียใดๆ เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการเลย ซึ่งเป็นไปไม่ได้ แต่สิ่งที่ใช้ในการอ้างอิงประสิทธิภาพที่เป็นที่ยอมรับกันก็คือ ค่าประสิทธิภาพไอเซนทรอปิค (isentropic efficiency) โดยที่สามารถกำหนดได้โดยการใช้อัตราส่วนระหว่างงานที่ต้องการใช้เมื่อกระบวนการเป็นกระบวนการไอเซนทรอปิค



(ก) ปริมาตรและความดันในกระบอกสูบของเครื่องอัดไอ



(ข) ลักษณะรูปร่างของเครื่องอัดไอ

รูปที่ 3.10 แสดงรูปแบบการทำงานของเครื่องอัดไอแบบสูบชัก (ก) ปริมาตรและความดันในกระบอกสูบของเครื่องอัดไอ (ข) ลักษณะรูปร่างของเครื่องอัดไอ

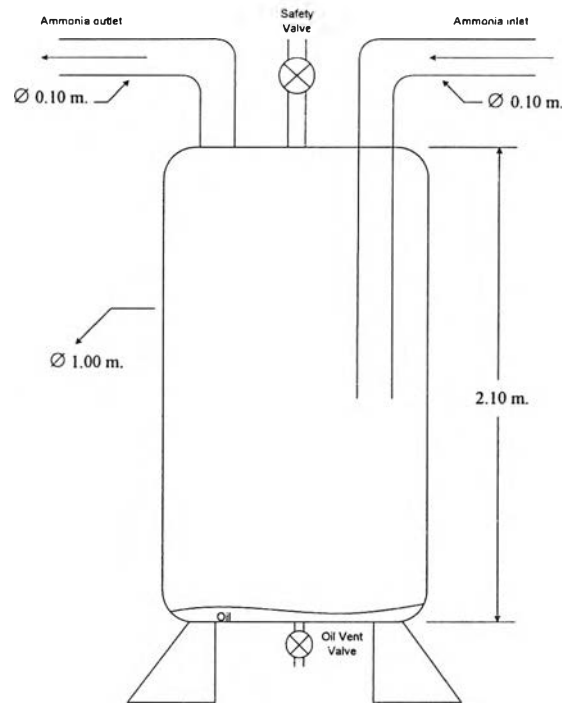
กับงานที่ใช้ในการอัดไอจริง และโดยส่วนมากประสิทธิภาพของเครื่องอัดไอจะถูกกำหนดโดยใช้ค่าประสิทธิภาพไอเซนทรอปิคนี้

เมื่อทำการพิจารณาเครื่องอัดไอแบบสูบชัก (reciprocating compressor) กระบอกสูบจะทำการอัดไอโดยจากความดันด้านดูด (suction pressure, P_S) ขึ้นไปจนถึงความดันด้านส่ง (discharge pressure, P_D) เราจะเรียกอัตราส่วนของ P_S/P_D ว่าอัตราส่วนการอัด (compression ratio) จากรูปที่ 3.10(ก) เมื่อพิจารณาถึงวัฏจักรการอัดแล้วสามารถอธิบายได้โดยเริ่มต้นที่ จุดที่ 1 เป็นจุดที่ลูกสูบอยู่ที่ตำแหน่งต่ำที่สุดและมีปริมาตรมากที่สุด ความดันไอจะเป็นความดันด้านดูด จากจุดนี้ลูกสูบจะค่อยๆ เคลื่อนตัวขึ้นทำให้ปริมาตรกระบอกสูบลดลง มวลของไอจึงถูกอัดทำให้อุณหภูมิและความดันเพิ่มสูงขึ้น จุดที่ 2 ความดันจะสูงขึ้นจนเท่ากับความดัน ที่ตำแหน่งนี้วาล์วด้านส่งจะเริ่มเปิดออก จุดที่ 3 ลูกสูบจะถูกดันมาจนสูงสุด กระบอกสูบจะมีปริมาตรต่ำสุดและวาล์วด้านส่งจะปิด จุดที่ 4 ความดันจะลดลงมาจนถึงความดันด้านดูดอีกครั้ง ที่ตำแหน่งนี้วาล์วด้านดูดจะเปิดออกเพื่อเริ่มดูดไอเข้ามาในกระบอกสูบอีกครั้ง

3.4.1.2 ถังแยกน้ำมันออกจากไอแอมโมเนีย (Oil Separator Tank)

เมื่อเครื่องอัดไอทำการอัดไอแอมโมเนียแล้วก่อนที่ไอแอมโมเนียจะเข้าสู่เครื่องควบแน่นจะผ่านอุปกรณ์แยกน้ำมันออกจากไอแอมโมเนีย เนื่องจากในขณะที่แอมโมเนียกำลังถูกอัดที่เครื่องอัดไอนั้นในเครื่องอัดไอจะมีน้ำมันหล่อลื่นไหลอยู่โดยรอบกระบอกสูบ ซึ่งในขณะที่ทำการอัดไอแอมโมเนียนั้นจะมีน้ำมันส่วนหนึ่งเล็ดลอดเข้ามาผสมกับไอแอมโมเนียที่ทำการอัดอยู่นั้นได้ ดังนั้นจึงต้องมีการแยกเอาน้ำมันออกจากไอแอมโมเนียก่อนที่จะเข้าสู่เครื่องอัดไอเพื่อป้องกันน้ำมันเหล่านั้นหลุดเข้าไปในเครื่องควบแน่น ซึ่งมีผลทำให้น้ำมันเหล่านั้นเกาะอยู่ที่ผิวด้านในของท่อทำให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนลดลง

อุปกรณ์ถังแยกน้ำมันออกจากแอมโมเนียนี้มีลักษณะเป็นถังทรงกระบอกมีท่อทางเข้าและทางออกของไอแอมโมเนียอยู่ด้านบนของตัวถัง เมื่อไอแอมโมเนียไหลเข้าสู่ถังไอแอมโมเนียจะถูกพ่นกระจายออกภายในตัวถัง น้ำมันซึ่งมีน้ำหนักมากจะหล่นลงสู่ก้นถังและไอแอมเนียความดันสูงจะไหลออกทางท่อส่งออกไปยังเครื่องควบแน่น ดังแสดงในรูปที่ 3.11

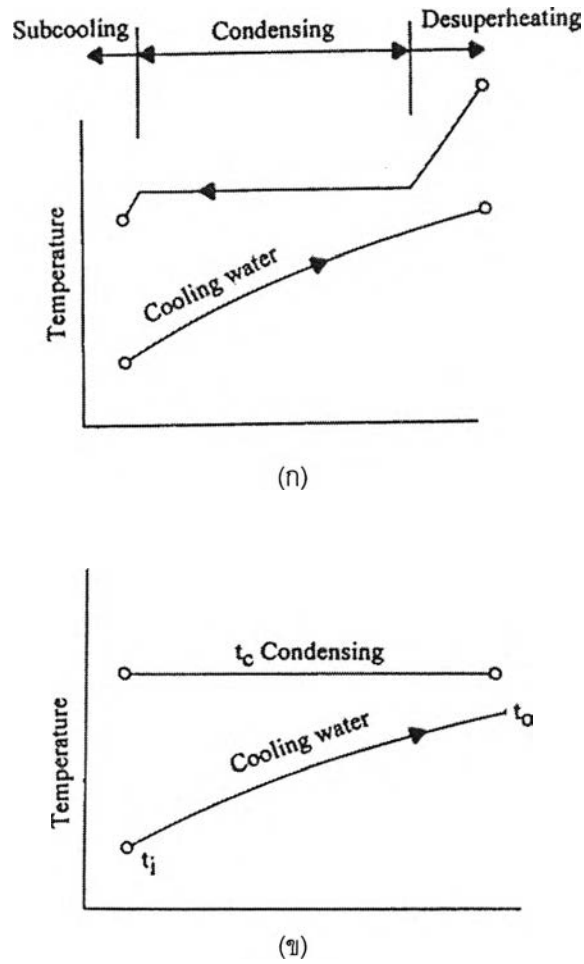


รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะของถังแยกน้ำมันออกจากไอแอมโมเนีย (oil separator tank)

3.4.1.3 เครื่องควบแน่น (Condenser)

เครื่องควบแน่น เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ทำหน้าที่ควบแน่นสารทำความเย็นจากสถานะไอให้กลายเป็นของเหลว เครื่องควบแน่น ที่นิยมใช้ในระบบทำความเย็นมีอยู่ 3 ประเภท คือ แบบหล่อเย็นด้วยอากาศ (air cooled) , แบบหล่อเย็นด้วยน้ำ (water cooled) และแบบระเหย (evaporative cooled) โดยเครื่องควบแน่นแบบระเหยถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในการเพิ่มอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนและเพิ่มประสิทธิภาพการทำความเย็นของระบบการทำงานของเครื่องควบแน่นแบบระเหย แบบทั่วไปที่ใช้กันนั้นคือ ปั๊มน้ำจะดูดน้ำจากแหล่งเก็บที่อยู่ใต้ เครื่องควบแน่น ขึ้นไปแล้วพ่นลงมาที่บริเวณผิวท่อของขดท่อนำสารทำความเย็น ในขณะเดียวกันนั้นอากาศจะถูกเป่าเข้าไปทะลุผ่านละอองน้ำที่กำลังตกลงมา ทั้งละอองน้ำและผิวท่อจะเย็นลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการสัมผัสกันอย่างดีระหว่างอากาศ, ผิวท่อและละอองน้ำ ทำให้น้ำบางส่วนระเหยไปกับอากาศซึ่งกระบวนการการเกิดการระเหยนี้จะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนดีขึ้น ในส่วนของน้ำที่ไม่ระเหยไปกับอากาศนั้นก็จะตกลงมาที่บริเวณด้านล่างของ เครื่องควบแน่น ข้อได้เปรียบของเครื่องควบแน่น แบบนี้คือ ความต้องการปั๊มในการปั๊มน้ำและความต้องการการปรับปรุงคุณภาพของน้ำลดลงจากแบบหล่อเย็นด้วยน้ำ และความต้องการความเร็วลมก็จะลดลงจากแบบหล่อเย็นด้วยลม

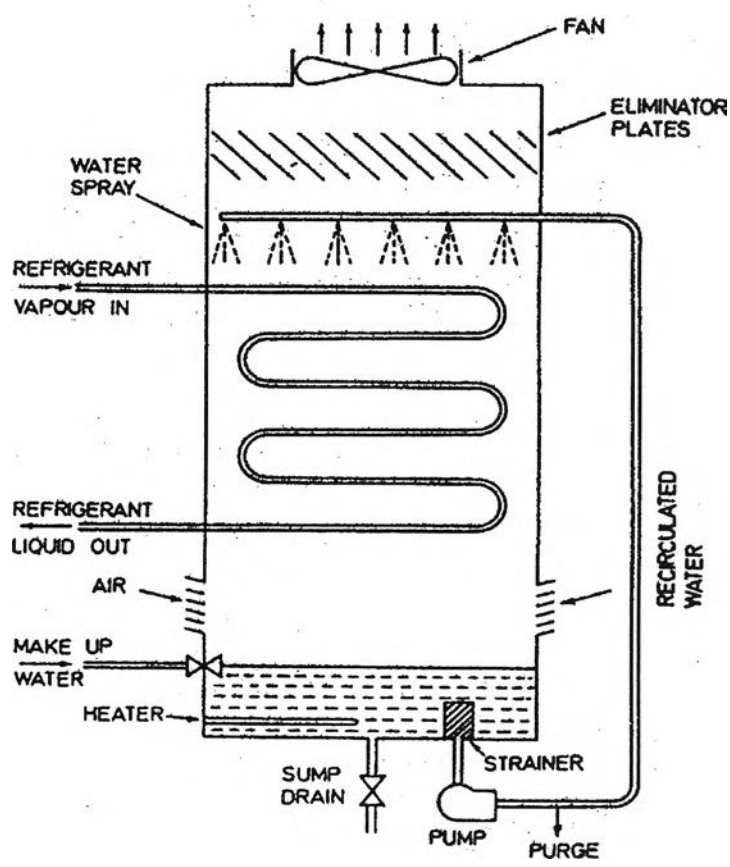
การที่เครื่องควบแน่นแบบระเหยถูกนำมาใช้งานกันอย่างกว้างขวางตามโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากพฤติกรรมในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการพาความร้อนโดยใช้ละอองน้ำนำความร้อนออกมาจากพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนและใช้อากาศพัดผ่านทำให้ละอองน้ำเหล่านั้นมีการระเหยออกไป ซึ่งการระเหยนี้ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น ทำให้อุณหภูมิหลังจากการควบแน่นต่ำกว่าแบบที่ใช้อากาศและแบบที่ใช้น้ำในการหล่อเย็น



รูปที่ 3.12 แสดงลักษณะการแลกเปลี่ยนความร้อนใน Evaporative Condenser

(ก) แสดงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริง (ข) แสดงพฤติกรรมโดยประมาณที่ใช้ในการประมาณค่า

พฤติกรรมการแลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องควบแน่นมีความซับซ้อนเนื่องจากสถานะของสารแลกเปลี่ยนความร้อนมีทั้งสภาพ ไอร้อนยิ่งยวด , ของเหลวอัดตัว และของผสมอิ่มตัว อยู่ในกระบวนการการควบแน่นนี้ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.12 (ก) แต่ในการประมาณค่าการแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นเราจะใช้การประมาณแบบที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.12 (ข) ในการประมาณค่าพฤติกรรมการแลกเปลี่ยนความร้อนนี้ได้เนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อนในช่วงที่เป็นไอร้อนยิ่งยวดกับช่วงที่เป็นของเหลวอัดตัวนั้นจะถูกชดเชยไว้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจริง (actual heat transfer coefficient) ของกระบวนการพาความร้อนซึ่งมีค่าน้อยกว่ากระบวนการการควบแน่น ดังนั้นจึงสามารถใช้การประมาณค่านี้ได้อย่างใกล้เคียงโดยใช้พฤติกรรมการแลกเปลี่ยนความร้อนตามรูปที่ 3.12(ข) ลักษณะและรายละเอียดของเครื่องระเหยที่ใช้อยู่ในโรงน้ำแข็งได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.13



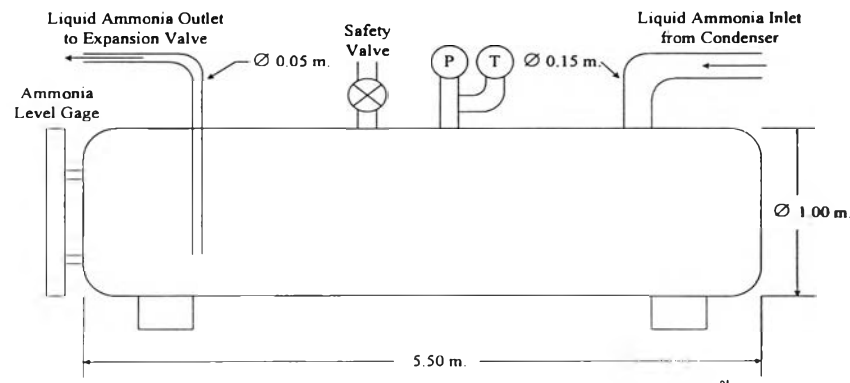
รูปที่ 3.13 แสดงการทำงานของเครื่องควบแน่นชนิดที่ใช้ในโรงน้ำแข็ง

3.4.1.4 ถังเก็บแอมโมเนียเหลว (Ammonia Liquid Storage Tank)

เมื่อสารทำความเย็นเกิดการควบแน่นในเครื่องควบแน่นแล้วสารทำความเย็นจะไหลเข้ามายังถังเก็บแอมโมเนียเหลว ถังเก็บแอมโมเนียเหลวมีหน้าที่รับสารทำความเย็นแอมโมเนียที่ควบแน่นเป็นของเหลวแล้วจากเครื่องควบแน่น และเก็บเอาไว้จนกระทั่งเครื่องระเหยต้องการใช้งานสารทำความเย็นนี้ โดยที่ระดับของแอมโมเนียในถังเก็บแอมโมเนียเหลวนั้นจะถูกควบคุมด้วยวาล์วลดความดันและอัตราการไหลเข้าและไหลออกโดยปกติแล้วจะเป็นอัตราเดียวกัน

ในการวางถังเก็บแอมโมเนียเหลวทั่วไปนั้นจะถูกวางให้อยู่ในตำแหน่งที่ต่ำกว่าเครื่องควบแน่น เพื่อที่จะได้ประโยชน์จากแรงโน้มถ่วงของโลกอีกทั้งยังเป็นตัวดักอากาศและแก๊ซที่ไม่ต้องการในระบบท่อโดยธรรมชาติ ลักษณะและขนาดของถังเก็บแอมโมเนียเหลวได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.14 (ก)-(ข)

(ก) ลักษณะของถังเก็บแอมโมเนียเหลวที่ใช้ในโรงงานผลิตน้ำแข็งซอง



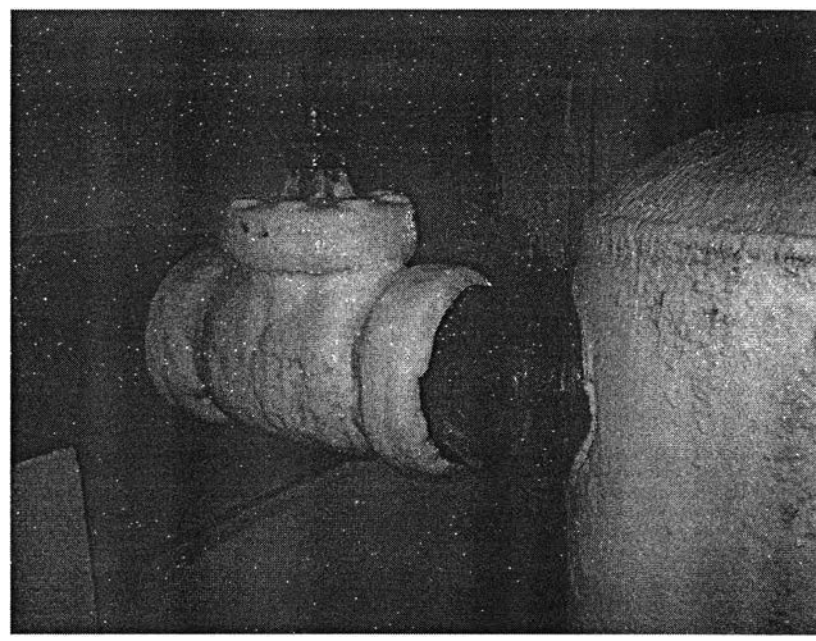
(ข) ขนาดของถังเก็บแอมโมเนียเหลวที่ใช้ในโรงงานผลิตน้ำแข็งซอง

รูปที่ 3.14 แสดง (ก) ลักษณะของถังเก็บแอมโมเนียเหลว (ข) ขนาดของถังเก็บแอมโมเนียเหลว

3.4.1.5 วาล์วลดความดัน (Expansion Valve)

วาล์วลดความดันเป็นอุปกรณ์หลักของวัฏจักรการทำความเย็นมีหน้าที่หลักอยู่ 2 ประการ คือ ลดความดันของสารทำความเย็นและใช้ปรับอัตราการไหลของสารทำความเย็นที่จะเข้าสู่เครื่องระเหย

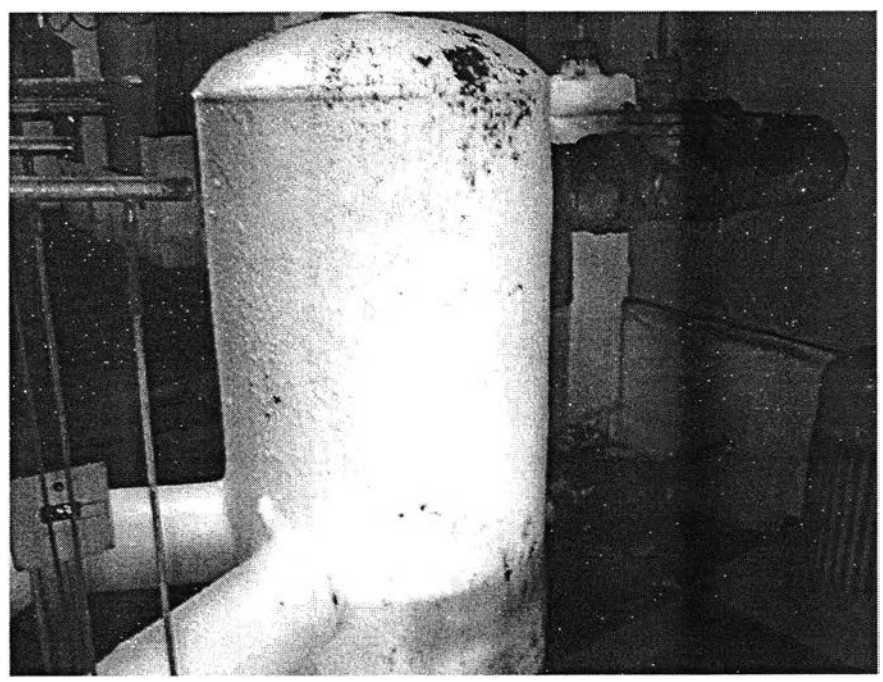
ประเภทของวาล์วลดความดันที่นิยมใช้กันมี 4 ชนิด คือ capillary tube , superheat-controlled , float valve และ constant-pressure expansion valve การทำงานของวาล์วลดความดันนั้นจะทำหน้าที่ลดความดันของสารทำความเย็นที่ออกจากเครื่องควบแน่นก่อนที่จะเข้าเครื่องระเหย โดยกระบวนการที่เกิดขึ้นเป็นการลดความดันโดยเอนทาลปีคงที่ (throttling process) สารทำความเย็นที่ไหลเข้าวาล์วลดความดันจะมีสถานะเป็นของเหลวเมื่อผ่านวาล์วลดความดันแล้วสารทำความเย็นจะมีสถานะของผสม รูปร่างของวาล์วลดความดันที่ใช้ในโรงงานแสดงไว้ในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แสดงรูปร่างของวาล์วลดความดันที่ใช้ในโรงงาน

3.4.1.6 ถังแยกไอแอมโมเนียและแอมโมเนียเหลว (Accumulator)

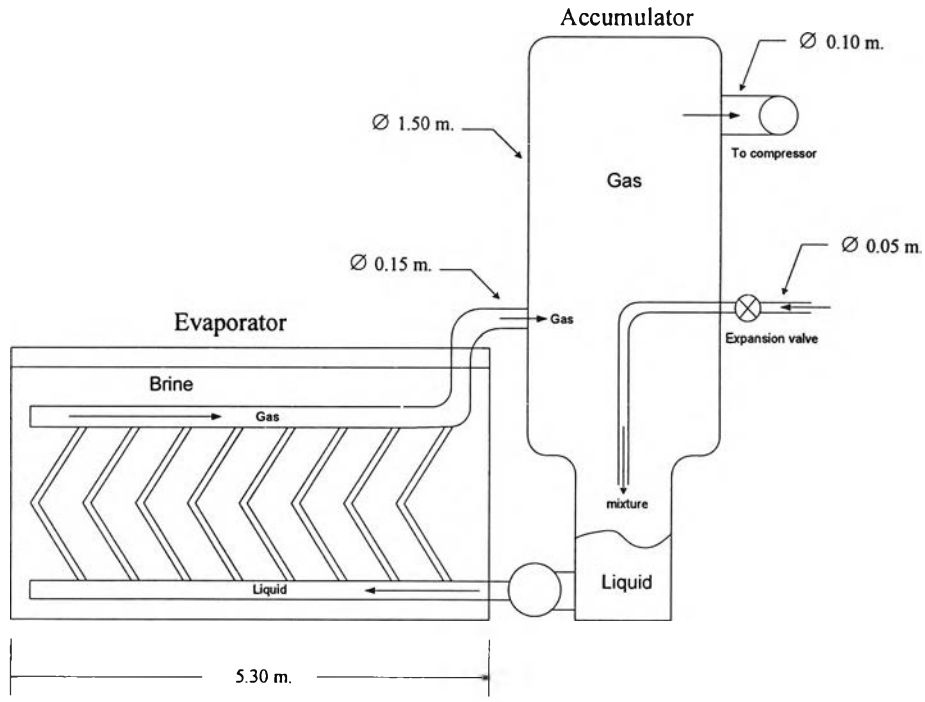
ถัง accumulator ที่ใช้อยู่ในโรงน้ำแข็งซองของบริษัทธวัชชัยน้ำแข็งหลอดนั้น มีลักษณะเป็นถังแยกไอกับของเหลวแบบแนวตั้ง มีหน้าที่หลักในการแยกของเหลวและไอแอมโมเนียออกจากกันเพื่อให้แน่ใจว่าไอแอมโมเนียที่ไหลเข้าสู่เครื่องอัดไอนั้นจะมีสถานะที่เป็นไอแอมโมเนียเท่านั้นไม่มีแอมโมเนียเหลวปะปนเข้ามา ประโยชน์อีกอย่างหนึ่งที่ได้จากการใช้ถัง accumulator คือพื้นผิวด้านในของเครื่องระเหยจะเปียกด้วยสารทำความเย็นเหลวตลอดเวลา ความดันในท่อส่งแอมโมเนียเหลวจะสูงกว่าความดันภายในท่อระเหยที่เป็นของผสม 2 สถานะ ความดันที่แตกต่างกันนี้ทำให้เกิดการหมุนเวียนของการไหลของสารทำความเย็น ลักษณะของถัง accumulator ที่ใช้ในโรงงานน้ำแข็งได้แสดงไว้ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 แสดงลักษณะของถัง accumulator

3.4.1.7 เครื่องระเหย (Evaporator)

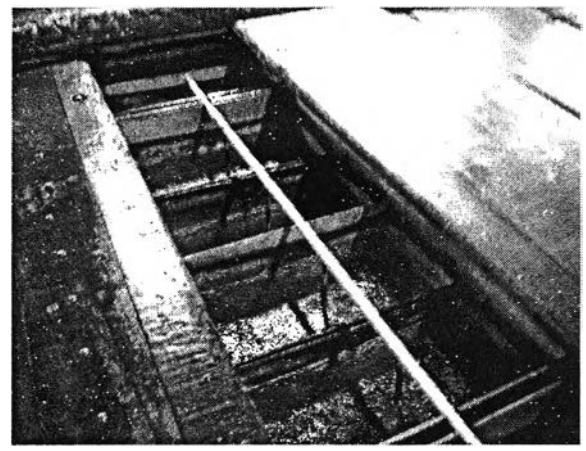
เครื่องระเหยเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยน้ำเกลือมีหน้าที่รับความร้อนมาจากน้ำที่ใช้ทำน้ำแข็ง ซึ่งน้ำเกลือที่อยู่ในบ่อทำความเย็นมีอุณหภูมิระหว่าง -9.2ถึง -6.9 องศาเซลเซียส ลักษณะของเครื่องระเหยที่ใช้อยู่ในโรงน้ำแข็งซองของบริษัทธวัชชัยน้ำแข็งหลอดนั้นจะรับสารทำความเย็นแอมโมเนียเหลวมาจากถัง accumulator แล้วไหลเข้ามาในขดท่อเครื่องระเหย ภายในขดท่อเมื่อสารทำความเย็นแอมโมเนียได้รับความร้อนแอมโมเนียจะเดือดและระเหยขึ้นไปด้านบนของขดท่อในสถานะที่เป็นไอร้อนยิ่งยวดเล็กน้อย แล้วไหลกลับเข้าสู่ถัง accumulator ทางด้านบนแล้วไหลออกจากถัง accumulator เข้าสู่เครื่องอัดไอ ลักษณะของเครื่องระเหยได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.17



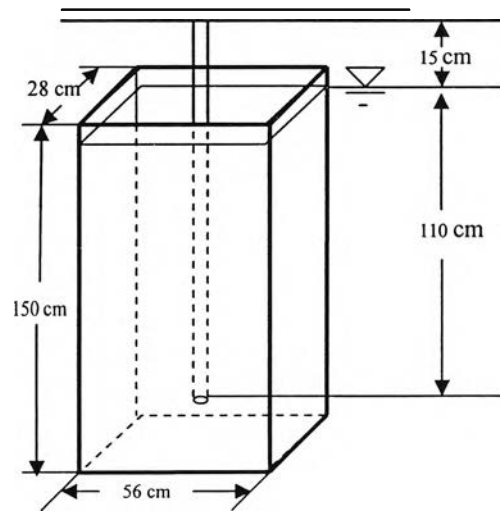
รูปที่ 3.17 ถัง accumulator และ evaporator

3.4.2 ระบบการจ่ายอากาศลงสู่ซองน้ำแข็ง

ในกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองในโรงงาน มีขั้นตอนสำคัญในการผลิตส่วนหนึ่ง คือ การจ่ายอากาศลงไปในซองน้ำแข็งเพื่อให้น้ำแข็งที่ผลิตได้มีลักษณะใส ไม่ขุ่น น้ำแข็งจะเกิดขึ้นจากขอบนอกของซองเข้ามากลางซอง ตามปกติของกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองในโรงงาน หลังจากที่นำซองน้ำแข็งที่บรรจุน้ำดิบลงในบ่อน้ำเกลือเป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมงหรือ 1 วัน โรงงานจะนำท่อจ่ายอากาศออกเพื่อไม่ให้ท่อติดไปกับน้ำแข็ง ลักษณะน้ำแข็งที่แข็งหลังจากนำท่อออกจะมีลักษณะขุ่นขาว ซึ่งจะต้องมีการตัดส่วนตรงกลางออกก่อนนำไปขาย โดยตัวอย่างการจ่ายอากาศตามท่อแสดงไว้ในรูปที่ 3.18 (ก) ขนาดของซองน้ำแข็งในโรงงานมีขนาดกว้าง 0.28 เมตร ยาว 0.56 เมตร สูง 1.50 เมตร และระยะของท่อจ่ายอากาศในโรงงานแช่อยู่ในซองน้ำแข็งประมาณ 1.1 เมตร แสดงไว้ในรูป 3.18 (ข)



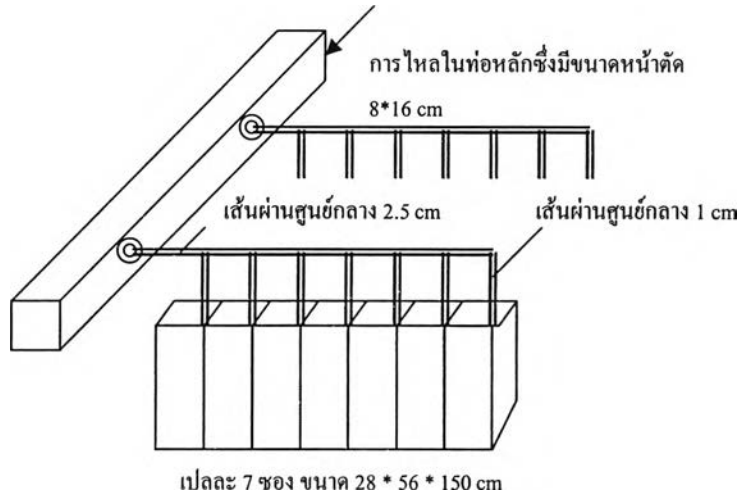
(ก)



(ข)

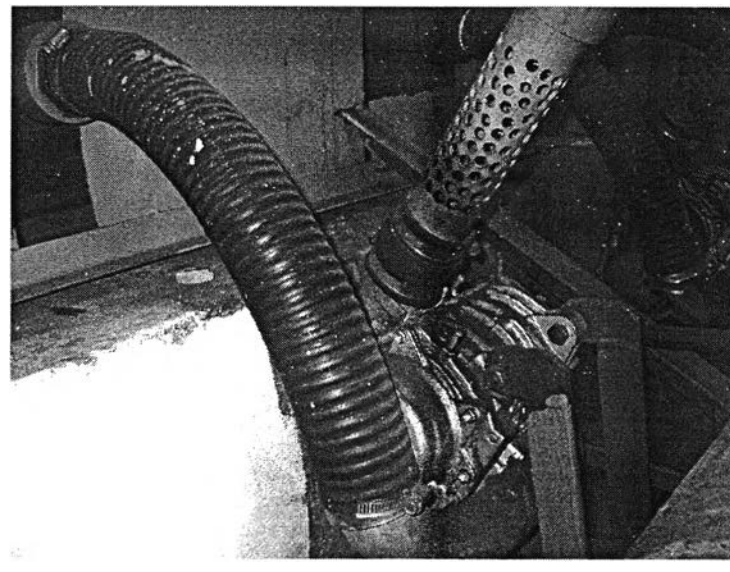
รูปที่ 3.18 แสดงการจ่ายอากาศตามท่อลงไปในซองน้ำแข็ง (ก) ซองน้ำแข็งในโรงงานน้ำแข็ง (ข) ขนาดและระยะห่างของท่อจ่ายอากาศในโรงงาน

วิธีการจ่ายอากาศในโรงงานน้ำแข็งที่นิยมทำ คือ การจ่ายอากาศผ่านท่อเส้นหลักที่มีขนาดกว้าง 8 เซนติเมตร ยาว 16 เซนติเมตร ก่อนที่จะแยกออกเป็นเปลย่อยๆ ซึ่งมีจำนวน เปลละ 7 ซอง ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 รูปแบบการจ่ายอากาศผ่านท่อหลัก ท่อสาขา และท่อที่จ่ายลงซองน้ำแข็ง

ส่วนอุปกรณ์ที่ใช้ในการจ่ายอากาศตามท่อเหล็กจนลงสู่ซองน้ำแข็ง โดยทั่วไปนิยมใช้ เครื่องอัดอากาศ โดยในระบบอากาศอัด(compressed air system) ที่ใช้ในโรงงานน้ำแข็งทั่วไปถูกออกแบบมาโดยไม่ซับซ้อนและใช้เพียงอุปกรณ์หลักคือ เครื่องอัดอากาศ ตัวกรองอากาศ(air filter) และระบบท่อจ่ายเท่านั้น ลักษณะของเครื่องอัดลมที่ใช้ในโรงงานแสดงไว้ในรูปที่ 3.20



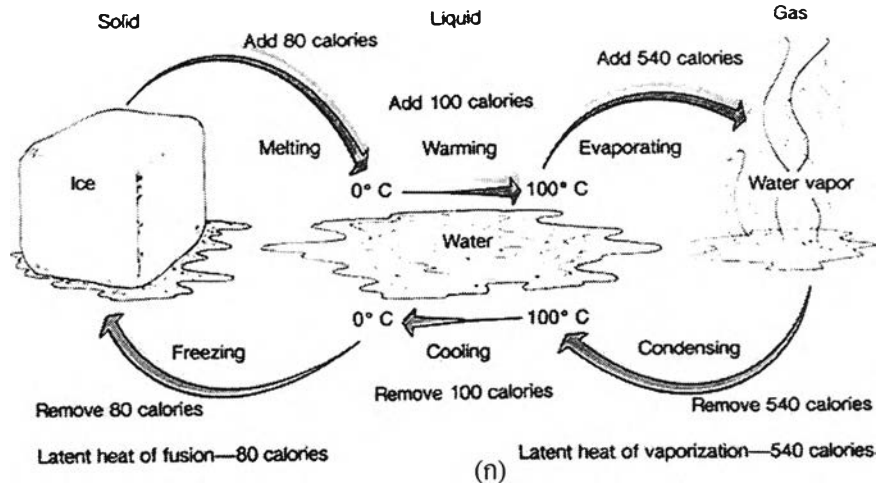
รูปที่ 3.20 แสดงลักษณะของเครื่องอัดอากาศที่ใช้ในโรงงาน

3.5 คุณสมบัติของน้ำ

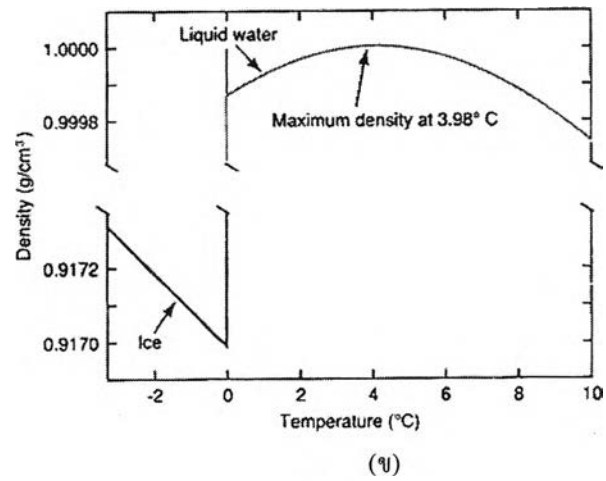
122470311

3.5.1 สมบัติทางความร้อนของน้ำและน้ำแข็ง

สมบัติทางความร้อนของน้ำและน้ำแข็งจะกล่าวถึงในภาคผนวก ส่วนการเปลี่ยนสถานะของน้ำเกิดโดย เมื่อโมเลกุลของน้ำได้รับพลังงานความร้อน หรือปลดปล่อยพลังงานความร้อนออก จะมีผลทำให้อะตอมมีพลังงานจลน์ที่ต่างกันออกไป จนทำให้น้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะระหว่างของแข็ง (น้ำแข็ง) ของเหลว (น้ำ) และก๊าซ (ไอน้ำ) ได้ ทั้งนี้เนื่องจากในภาวะที่เป็นน้ำแข็ง แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลจะยึดโมเลกุลของน้ำให้มีโครงสร้างแบบแข็งเกร็ง และจะทรงโครงสร้างที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส แต่เมื่อน้ำได้รับความร้อนจนมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นมากกว่า 0 องศาเซลเซียส อะตอมจะมีพลังงานจลน์มากขึ้น เกินกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล โมเลกุลจะมีลักษณะหลวม น้ำแข็งจะกลายเป็นน้ำหรือของเหลว เรียกกระบวนการนี้ว่า การหลอมเหลว(melting) ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็ง เรียกว่า การแข็งตัวของน้ำ (freezing) ถ้าให้พลังงานความร้อนกับน้ำต่อไปจนอุณหภูมิสูงเรื่อย ๆ อะตอมจะมีพลังงานจลน์เพิ่มขึ้น การเคลื่อนตัวของโมเลกุลจะว่องไวขึ้น จนเมื่ออุณหภูมิถึง 100 องศาเซลเซียส พลังงานจลน์จะมากเกินแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล ทำให้โมเลกุลหลุดและแยกตัวออกจากกันออกสู่อากาศ ที่เราเรียกกระบวนการนี้ว่าว่า การระเหยเป็นไอของน้ำ(evaporation) โดยไอน้ำเป็นภาวะที่สสารมีความหนาแน่นต่ำสุด ในทางตรงกันข้ามถ้าไอน้ำเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำ เรียกว่า การควบแน่นของน้ำ (condensation) การเปลี่ยนสถานะของน้ำแสดงไว้ในรูปที่ 3.21 (ก) ความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของน้ำโดยอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลง เรียกว่า ความร้อนแฝง (latent heat) มีหน่วยเป็นแคลอรีต่อกรัม (cal/g) น้ำ 1 กรัมจะเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งต้องคายความร้อนออก 80 แคลอรี ในทางตรงข้ามน้ำแข็งจะกลายเป็นน้ำต้องใช้ความร้อน 80 แคลอรี ในทำนองเดียวกันน้ำ 1 กรัม จะกลายเป็นไอน้ำต้องใช้ความร้อน 540 แคลอรี และเมื่อไอน้ำจะเปลี่ยนสถานะกลับเป็นน้ำต้องคายความร้อนออก 540 แคลอรี



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.21 (ก) แสดงแผนภาพการเปลี่ยนสถานะของน้ำ (ข) แสดงความหนาแน่นของน้ำขณะเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็ง

ความหนาแน่นของน้ำมีค่ามากสุดเมื่ออุณหภูมิ 3.98 องศาเซลเซียส เมื่ออุณภูมิลดลงจนกลายเป็นน้ำแข็ง ความหนาแน่นของน้ำเมื่อเทียบกับน้ำแข็ง น้ำแข็งจะมีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำที่จุดเปลี่ยนสถานะ ทำให้เมื่อเกิดการเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งจะเกิดการขยายตัว (expansion) ความหนาแน่นของน้ำและน้ำแข็งแสดงไว้ในรูปที่ 3.21 (ข)

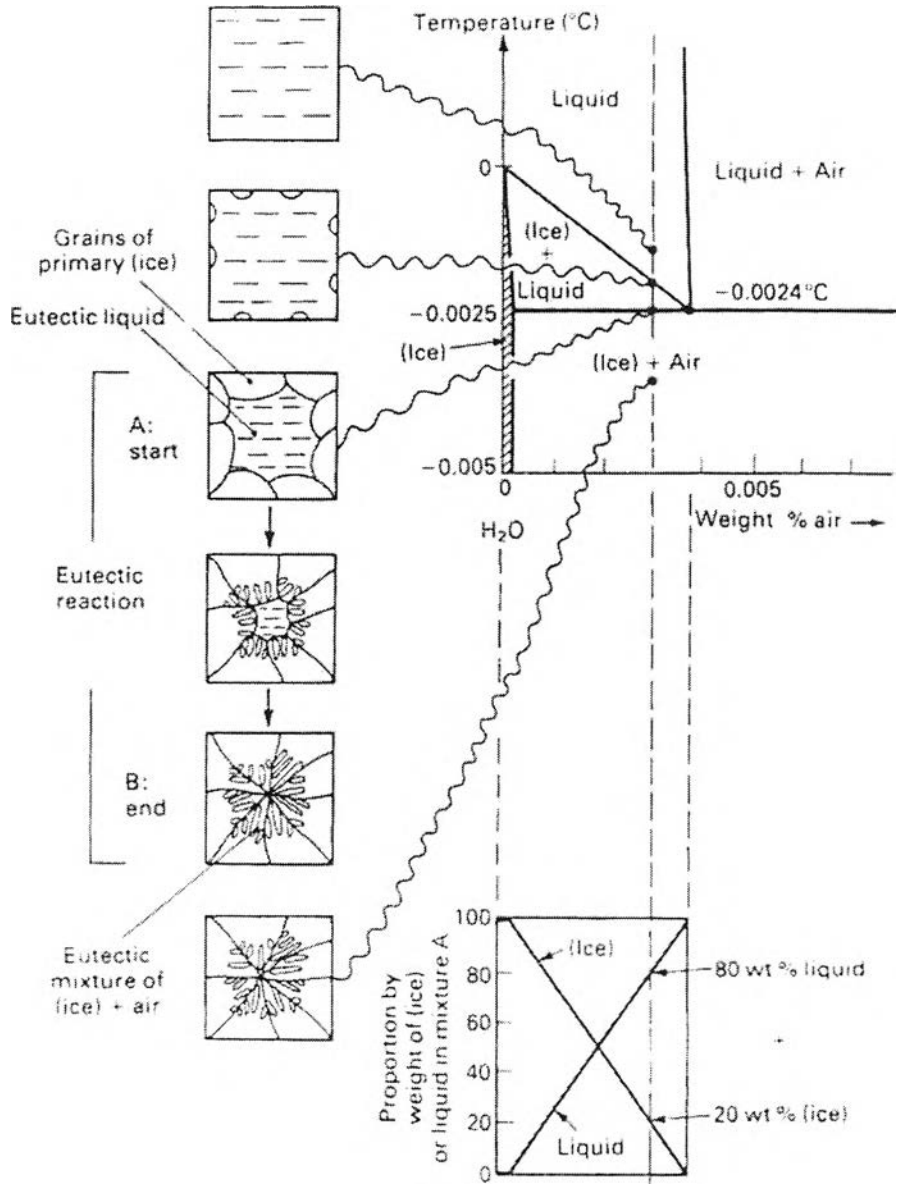
3.5.2 ความขุ่นของน้ำแข็ง(Turbidity)

ความขุ่นของน้ำหมายถึง การที่น้ำมีพวกสารแขวนลอยอยู่ในน้ำให้บดบังแสงทำให้ไม่สามารถมองลงไปในระดับน้ำที่ลึกได้สะดวก สารแขวนลอยที่ทำให้น้ำมีความขุ่น ได้แก่ ดินละเอียด อินทรียสาร อนินทรียสาร แพลงตอน และจุลินทรีย์ สารพวกนี้อาจมีบางพวกกระจายแสง บางพวกดูดซึมแสง สาเหตุที่ทำให้เกิดความขุ่นของน้ำอีกประการคือ การเกิดฟองน้ำเล็กๆ ความขุ่นของน้ำ มีความสำคัญต่อปัญหาทางด้านอนามัยสิ่งแวดล้อมและความน่าบริโภค

ความขุ่นของน้ำแข็งมีนิยามเช่นเดียวกับความขุ่นของน้ำ ความขุ่นของน้ำแข็งเกิดจากเกรน (grain) ที่เกิดขึ้นในน้ำแข็ง เมื่อเกิดเกรนเป็นจำนวนมากผิวของเกรนจะทำให้แสงไม่สามารถผ่านน้ำแข็งได้ และความขุ่นของน้ำแข็งยังสามารถเกิดได้จากฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมากที่อยู่ในน้ำแข็งทำให้แสงไม่สามารถผ่านน้ำแข็งได้เช่นกัน โดยอากาศสามารถแทรกตัวอยู่ในน้ำได้ ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส อากาศสามารถแทรกตัวอยู่ 0.003 % โดยน้ำหนัก อธิบายได้จากรูปที่ 3.22 เมื่อเราทำความเย็นกับของเหลวซึ่งมีอากาศแทรกตัวอยู่จะพบการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิ -0.002 องศาเซลเซียส เมื่อผ่านเส้น Liquidus จะเริ่มเกิดผลึกน้ำแข็งขึ้น เมื่อทำความเย็นต่อเนื่องไปน้ำแข็งจะผ่านจุดอุณหภูมิ-0.0024 องศาเซลเซียส จะพบว่าน้ำแข็งมีสัดส่วนของน้ำแข็งและน้ำ 20 % และ 80 % โดยน้ำหนัก ของเหลวจะมีปริมาณอากาศที่สามารถแทรกตัวได้มากที่สุด 0.0038 % โดยน้ำหนัก เมื่อมีการถ่ายเทความร้อนแฝงที่จุด -0.0024 องศาเซลเซียสจะเกิดปฏิกิริยาดังนี้

ของเหลว eutectic (น้ำ+อากาศ 0.0038 % โดยน้ำหนัก) ⟶ ของผสม eutectic + อากาศ

สุดท้ายเมื่อน้ำเปลี่ยนสถานะเป็นของผสมน้ำแข็งกับอากาศแล้ว น้ำแข็งซึ่งมีอากาศละลายได้น้อยลงกว่าน้ำจะไม่สามารถให้อากาศละลายอยู่ในน้ำแข็งได้ ทำให้เกิดฟองอากาศเล็กๆ ซึ่งมีประมาณ 0.0038% โดยน้ำหนัก เมื่อเทียบเป็นปริมาตร คือ ประมาณ 2.92% โดยปริมาตร จึงทำให้น้ำแข็งขุ่นเพราะมีฟองอากาศปริมาณมากไปทำให้เกิดการเบนของแสงที่ผ่าน ฟองอากาศที่แทรกอยู่สามารถเกิดได้จากส่วนผสมeutectic การป้องกันโดยให้น้ำมีการเคลื่อนที่ในขณะเกิดปฏิกิริยาดังกล่าว หรือการอธิบายทางกายภาพเป็นการที่อากาศทำให้น้ำมีการเคลื่อนที่ทำให้มีการไหลของน้ำไปไล่ฟองอากาศบริเวณผิวหน้าของน้ำแข็ง



รูปที่ 3.22 แสดงแผนภูมิเฟสของน้ำและแสดงรูปการกักตัวของฟองน้ำ

สำหรับโรงงานน้ำแข็งซองทั่วไปจะมีวิธีหลีกเลี่ยงการเกิดความขุ่นของน้ำแข็งโดยวิธีการจ่ายอากาศลงไปในซองน้ำแข็ง โดยปริมาณอากาศที่จ่ายลงไปในซองน้ำแข็งนั้น สามารถนำมาวิเคราะห์หาความเป็นไปได้ในการลดการใช้พลังงานส่วนเกินซึ่งเป็นจุดประสงค์หลักในงานวิทยานิพนธ์นี้